引用格式：周天军，陈晓龙.《巴黎协定》温控目标下未来碳排放空间的准确估算问题辨析. 中国科学院院刊, 2022, 37(2): 216-229.
Zhou T J, Chen X L. Perspective on challenges in accurately estimating remaining carbon budget for climate targets of Paris Agreement. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(2): 216-229. (in Chinese)

《巴黎协定》温控目标下未来碳排放空间的准确估算问题辨析

周天军[1,2*]　陈晓龙[1]

1 中国科学院大气物理研究所 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 北京 100029
2 中国科学院大学 地球与行星科学学院 北京 100049

摘要　为了应对工业化以来的全球增暖问题，《联合国气候变化框架公约》缔约方通过《巴黎协定》设定了“将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2℃以内，并努力将温度上升幅度限制在1.5℃以内”的目标。当前，全球平均表面温度相对工业革命前的升温已超过1℃，累积二氧化碳（CO_2）排放达到2 390 Gt。因此，要实现《巴黎协定》的1.5℃和2℃温控目标，需要准确估算未来剩余的碳排放空间。文章在概述地球系统碳循环与升温关系的基础上，对未来碳排放空间的估算方法进行评述，分析讨论了政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告（AR6）和IPCC第五次评估报告（AR5）发布以来在碳排放空间估算方面的国际研究进展，探究了造成估算结果差异的原因并指出影响未来碳排放空间估算准确性的关键因素。最后，围绕未来碳排放空间的准确估算问题，提出了亟待加强的研究领域。文章可为科学界在温控目标下准确估算未来碳排放空间核算数据及未来的研究重点方向提供参考。

关键词　巴黎协定，温控目标，政府间气候变化专门委员会（IPCC），未来碳排放空间

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20211108005

气候变化是人类社会面临的严峻挑战。2015年，《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）第21次缔约方大会（COP21）通过了《巴黎协定》，明确温控目标是“将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2℃以内，并努力将温度上升幅度限制在1.5℃以内”[1]。2021年11月1—12日，UNFCCC第26次缔约方大会（COP26）在英国格拉斯哥召开，会议签署了《格拉斯哥气候公约》，完成了对《巴黎协定》实施

*通信作者
资助项目：第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0102），国家重点研发计划（2018YFC1507701）
修改稿收到日期：2022年1月21日

细则遗留问题的谈判；强调要迅速采取行动，全面落实《巴黎协定》，开始全球盘点，并对碳交易市场、透明度和共同时间框架做出了规定。

根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告（AR6）第一工作组报告——《气候变化 2021：自然科学基础》，最近 10 年（2011—2020 年），全球平均表面温度比 1850—1900 年升高 1.09℃（0.95℃—1.20℃）。除非进行快速和大规模的温室气体减排，否则较之 1850—1900 年的全球平均升温在未来 20 年可能达到或超过 1.5℃，从而使得《巴黎协定》1.5℃ 的温控目标难以实现[2]。

在碳达峰、碳中和势在必行的形势下，“有多少、谁来减、减多少”是目前急需解决的问题。据IPCC AR6 估计，1850—2019 年，人类活动已经释放了 2390 Gt CO_2，若在 21 世纪末把全球升温控制在 1.5℃ 以内，则 2020 年开始的未来碳排放空间是 400—500 Gt $CO_2$①；若把温控目标设定为 2℃，则 2020 年开始的未来碳排放空间是 1 150—1 350 Gt CO_2[2]。不管设定哪种目标，若以当前每年排放大约 40 Gt CO_2 的速率，剩余的排放空间都将在几十年内耗尽。

未来碳排放空间的估算问题，事关气候变化减缓政策的制定和 UNFCCC 缔约国的气候谈判。那么，我们关于特定温控目标下未来碳排放空间估算的依据是什么？结果存在多大的不确定性？需要开展哪些研究来提高估算的准确性？本文对此进行讨论。

1 地球系统碳循环和全球升温的关系

地球气候系统的碳循环过程如图 1 所示。化石燃料使用所导致的人为 CO_2 排放进入大气后，与海洋和陆面存在 2 种反馈过程：① 气候反馈，即大气通过辐射、温度、降水、风应力等的变化来影响海表和陆面；② 碳反馈，包括大气-陆面、大气-海洋间的多种生物化学正、负反馈过程。在这些反馈过程的综合作用下，地球系统的人为 CO_2 收支结果如表 1 所示，包括 1750—2019 年、1850—2019 年、1980—1989 年、1990—1999 年、2000—2009 年 和 2010—2019 年共 6 个

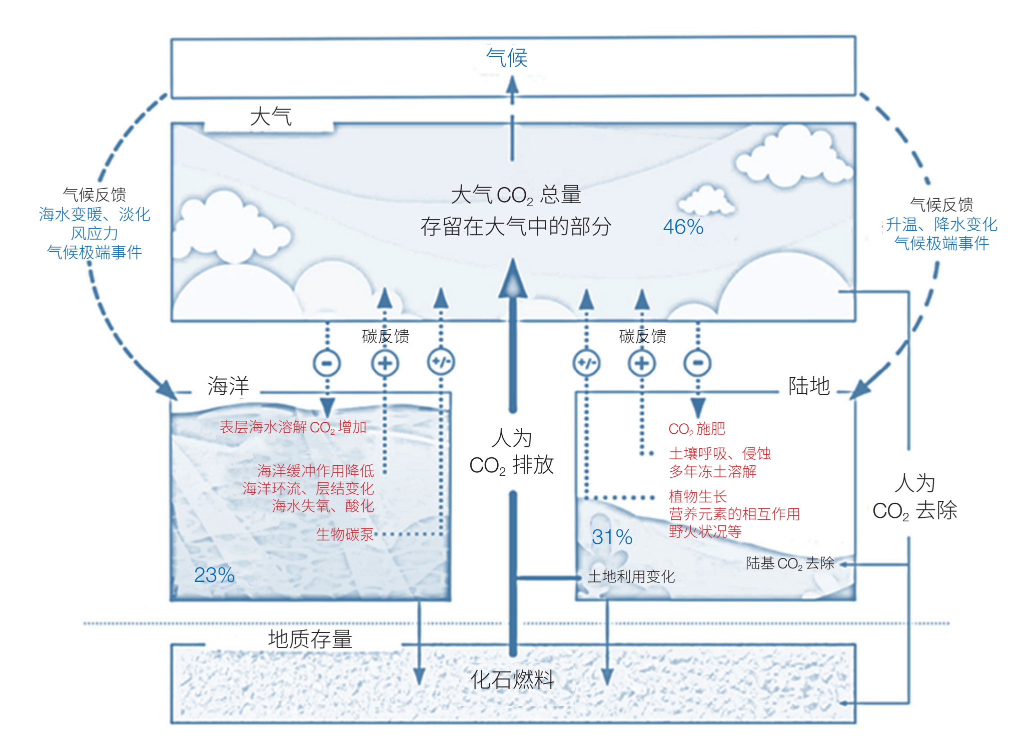


图 1　地球系统的碳循环和碳 - 气候反馈过程示意图

Figure1　Schematic of carbon cycle and carbon-climate feedback of Earth system

图中人为排放 CO_2 分配到各部分的比例基于 2010—2019 年数据；参考 IPCC AR6 第 5 章数据和材料绘制

The percentages of anthropogenic CO_2 emissions portioned into different reservoirs are based on data during 2010 to 2019; drawn by referring to data and materials of IPCC AR6 Chapter 5

① 本文给出的碳排放空间都是概率为 50%—67% 的分位数范围。

表 1　1750—2019 年分时间段累积碳排放和年平均增长率对比结果

Table 1　Comparison results of cumulative carbon emissions and annual average growth rate by time period from 1750 to 2019

排放时段		1750—2019年累积排放（Pg C）	1850—2019年累积排放（Pg C）	1980—1989年平均增长率（Pg C/a）	1990—1999年平均增长率（Pg C/a）	2000—2009年平均增长率（Pg C/a）	2010—2019年平均增长率（Pg C/a）
排放来源	化石燃料燃烧和混凝土生产	445±20	445±20	5.4±0.3	6.3±0.3	7.7±0.4	9.4±0.5
	土地利用净排放	240±70	210±60	1.3±0.7	1.4±0.7	1.4±0.7	1.6±0.7
	总排放	685±75	655±65	6.7±0.8	7.7±0.8	9.1±0.8	10.9±0.9
排放去向	大气中碳的增加	285±5	265±5	3.4±0.02	3.2±0.02	4.1±0.02	5.1±0.02
	海洋吸收	170±20	160±20	1.7±0.4	2.0±0.5	2.1±0.5	2.5±0.6
	陆面吸收	230±60	210±55	2.0±0.7	2.6±0.7	2.9±0.8	3.4±0.9
收支不平衡项		0	20	–0.4	–0.1	0	–0.1

注：1 Pg C=3.667 Gt CO_2；正负（±）不确定范围表示68%的置信区间；改编自IPCC AR6的表5.1

Note: 1 Pg C=3.667 Gt CO_2; uncertainties represent the 68% confidence interval; adapted from IPCC AR6 Table 5.1

时间段的收支统计结果。由表 1 可以看出，海-陆-气的收支比例因统计时段而异，就 2010—2019 年平均而言，人为的 CO_2 排放最终约有 46% 存留在大气中，23% 被海洋吸收，31% 被陆地吸收[3]。

为了更好地服务于温控目标下的气候变化减缓决策，需要设计一个指标来描述 CO_2 排放和全球升温的关系。分析表明，工业化以来的人为累积 CO_2 排放和全球表面升温之间存在近似线性的关系（图 2），这种关系被称为"累积 CO_2 排放的瞬态气候响应"（TCRE）。该指标被用来定量化描述每排放 1 000 Gt CO_2 所对应的全球表面平均气温的变化。TCRE综合反映了累积 CO_2 排放最终余留在大气中的份额②和瞬态全球平均气温对大气 CO_2 浓度的敏感性——表示为瞬态气候响应（TCR）③的信息[7]。图 2 所展示的这一准线性关系，至少在 5 500 Gt CO_2 的累积排放下都是稳定的[4]，这意味着对应特定的升温幅度，人为 CO_2 的总排放量是有限的。若要在某个时间段实现某个温控目标，则必须在一定时期实现 CO_2 的净零排放。因此，准确估算《巴黎协定》1.5℃ 和 2℃ 温控目标下的未来 CO_2 排放空间，对于科学规划减排路径、及时出台有效的减排政策、推动国际气候变化谈判、最终实现温控目标，都具有重大意义。

从 IPCC 第五次评估报告（AR5）到 IPCC《全球升温 1.5℃ 特别报告》（SR1.5）和 IPCC AR6，科学界多次评估了温控目标下的碳排放空间。由于 IPCC AR5、SR1.5 和 AR6 的发布时间不同④，因此它们估算的碳排放空间在统计时间段上存在差异，数据彼此不可比[4-6]。为了便于和 IPCC AR6 的数据作比较，我们把 IPCC AR5 和 SR1.5 估算的碳排放空间统一折算⑤为从 2020 年开始，结果如图 3 所示。其中：IPCC

② 即 CO_2 排放总量中最终留在大气中的部分，它由碳循环过程决定。
③ TCR 是重要的气候敏感度指标，表示 CO_2 浓度每年增加 1% 直至达到工业化前 2 倍时全球平均表面温度的瞬态变化。
④ 分别是 2013 年、2018 年和 2021 年。
⑤ 折算方法见附录 1。

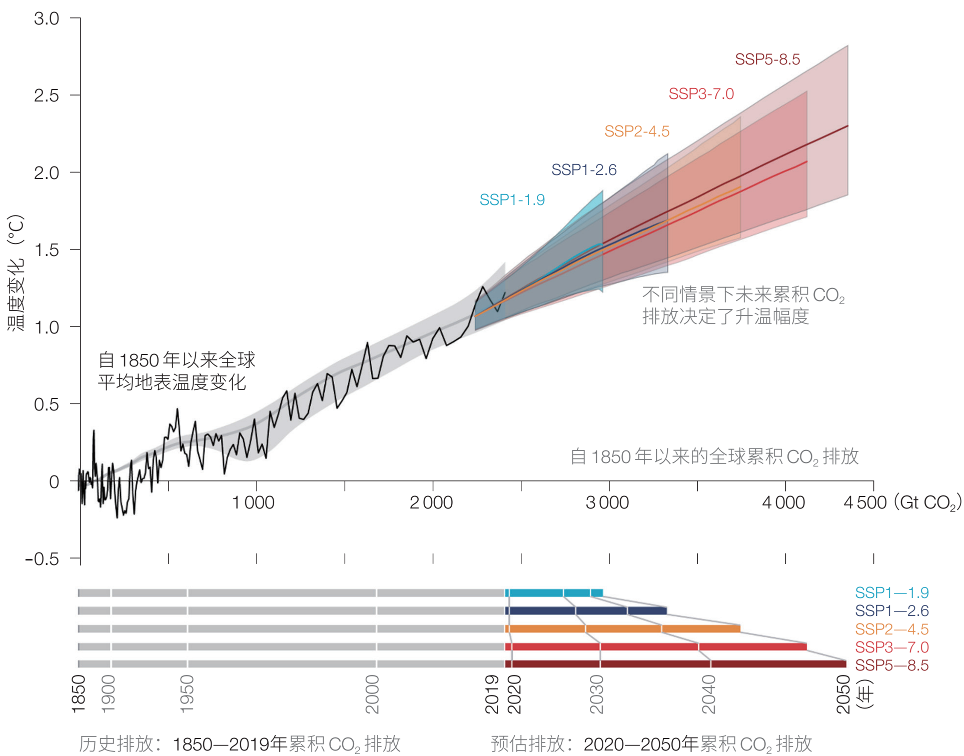


图 2　1850—2050 年累积 CO_2 排放和全球平均表面温度变化之间近似线性的关系

Figure 2　Near-linear relationship between cumulative CO_2 emissions and increase in global surface temperature from 1850 to 2050

黑线表示历史观测中全球地表平均温度相对 1850—1900 年的变化，灰线及阴影范围表示人类活动引起的增暖；彩色线条及阴影表示对应 5 种演示情景下 CMIP 6 模式的预估结果（SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5），SSP1-1.9 和 SSP1-2.6 分别演示了温控目标 1.5℃和 2℃的情景（改编自 IPCC AR6 决策者摘要图 10）

The black line shows observed global surface temperature increase relative to 1850–1900 as a function of historical cumulative CO_2 emissions in Gt CO_2 from 1850 to 2019. The gray line and its range show an estimate of the historical human-caused surface warming. Coloured lines and ranges show the median estimate as a function of cumulative CO_2 emissions, and the assessed very likely range of global surface temperature from 2020 until year 2050 for the set of illustrative scenarios (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5), in which SSP1-1.9 and SSP1-2.6 illustrate 1.5℃ and 2℃ warming target, respectively (adapted from IPCC AR6 SPM.10)

AR5报告对应的 1.5℃ 温控目标下，未来排放空间是 –60—140 Gt CO_2，2℃ 温控目标下为 620—870 Gt CO_2；IPCC SR1.5 报告对应的 1.5℃ 温控目标下未来碳排放空间是 340—500 Gt CO_2，2℃ 温控目标下为 1 090—1 420 Gt CO_2。；IPCC AR6 给出的 1.5℃ 温控目标下的排放空间为400—500 Gt CO_2，2℃ 温控目标下的排放空间为 1 150—1 350 Gt CO_2。IPCC AR6 结果和 IPCC SR1.5 彼此接近，但都与 IPCC AR5 差别较大。为何估算结果在前后几年间差别如此之大？这与我们在若干重要环节上科学认知水平的提升和数据证据的日益丰富有关。以下从排放空间估算方法学的角度进行讨论。

2 未来碳排放空间的估算方法

自 IPCC SR1.5 以来，科学界发展了新

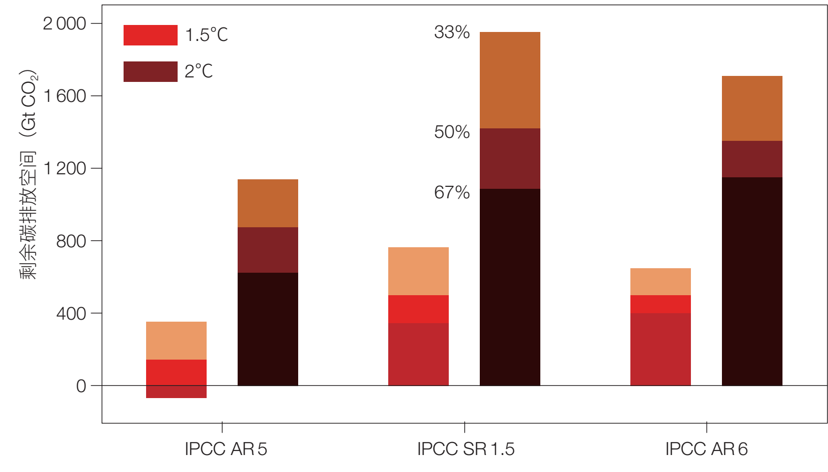


图 3　1.5℃和 2℃温控目标下 2020 年后的全球碳排放空间

Figure 3　Global remaining carbon budgets after 2020 under temperature control targets of 1.5℃ and 2℃

由于 IPCC AR5 和 SR1.5 中的原始数值分别是从 2012 年和 2018 年开始计算的，本文根据 2020 年全球碳收支报告[3]，分别扣除了 2012—2019 年和 2018—2019 年的实际碳排放量（320 Gt CO_2 和 80 Gt CO_2），统一折算为与 IPCC AR6 保持一致的、从 2020 年开始计算的剩余碳排放空间，并给出了 33%、50% 和 67% 3 个概率分位点的值，其中 SR1.5 和 AR6 是基于 TCRE 的概率分布给出的，AR5 是基于 CMIP5 地球系统模式模拟结果的概率分布给出的

The original values in IPCC AR5 and SR1.6 are calculated from 2012 and 2018, respectively. Here, the values are unified to be from 2020 as in IPCC AR6 by deducting the actual emissions during 2012–2019 and 2018–2019[3], that is 320 Gt CO_2 and 80 Gt CO_2, respectively. Three percentiles of 33%, 50%, and 67% are shown, which are based on the probability distribution of TCRE for SR1.5 and AR6 whereas based on the probability distribution of CMIP5 Earth system model simulations for AR5

的框架来估算未来 CO_2 排放空间（图 4）。该框架以估算 TCRE 为基础，分别考虑历史升温、非 CO_2 温室气体的排放、达到净零排放后的惯性升温⑥、地球系统反馈等因素的影响。通过单独评估这些因素的作用，最终得到未来 CO_2 排放空间的范围。

（1）TCRE 的估算。估算 TCRE有多种方法，包括基于不同复杂度的地球系统模式的模拟、使用简单的气候模型、利用观测约束等。其中一种重要方法是先把 TCRE 估算结果的不确定性分解为 TCR 和人为排放的 CO_2 留在大气中的百分比 2 个方面，然后再对二者分别评估。IPCC AR6 中基于过程理解、器测数据、古气候资料、萌现约束等多种来源的证据，对 TCR 的值进行了综合而细致的评估，把 TCR 的可能范围（不低于 66% 的概率）从 AR5 中的 1.0℃—2.5℃缩减为 IPCC AR6 中的 1.4℃—2.2℃，最优估计值为 1.8℃，这显著减小了 TCRE 的不确定性范围。进一步把新的 TCR 用于 TCRE 的估算，并结合基于地球系统模式的专家判断所给出的人为排放 CO_2 最终留大气中的百分比（53%±6%），得到 TCRE 的最优估计值为 0.45 ℃/(1 000 Gt CO_2)，可能范围是 0.27—0.63 ℃/(1 000 Gt CO_2)⑦。随着全球增暖，未来海洋和陆面过程对碳的吸收比例会降低，因此，这里采用的人为排放 CO_2 留在大气中的比例（53%）要略高于 1960—2019 年的观测平均值（44%）。TCRE 这一最新估算结果的不确定性范围，比 AR5 给出的 0.22—0.68 ℃/(1 000 Gt CO_2) 的范围明显缩小，这主要得

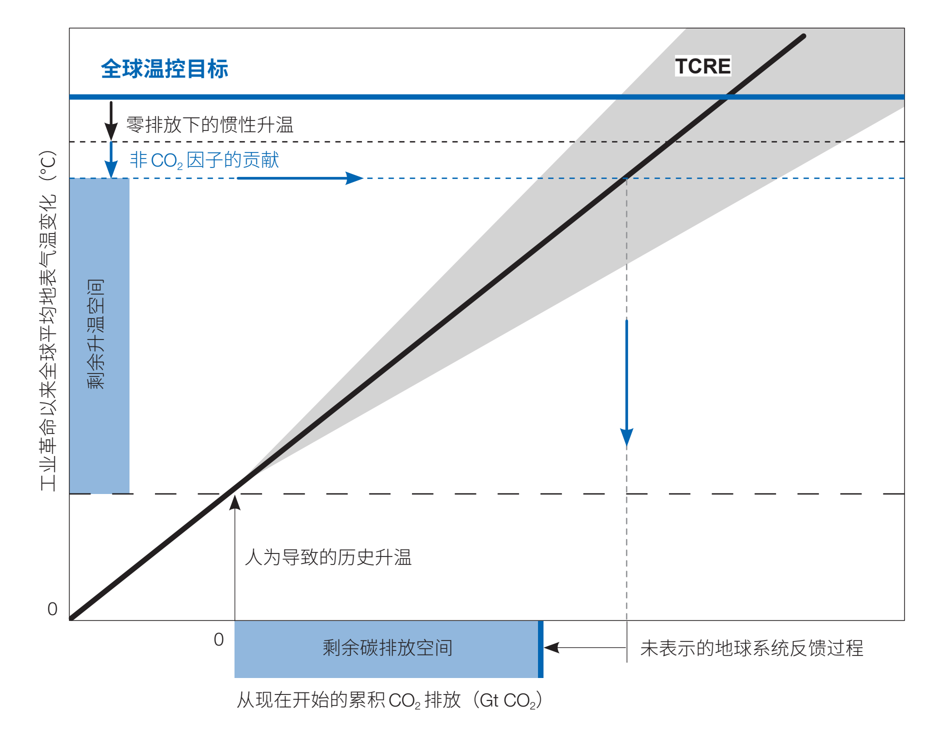


图 4　IPCC AR6 中估算剩余 CO_2 排放空间的概念框架

Figure 4　Conceptual framework of estimating remaining CO_2 budget

横轴负值表示工业化后某个时间累积到当前的历史排放；黑色实线表示累积 CO_2 排放与升温之间的准线性关系，斜率即为 TCRE 的值，灰色阴影表示存在一定的不确定范围；深蓝色实线表示升温目标，黑色长虚线表示当前已有的升温，两者之间为剩余的升温空间；达到 CO_2 净零排放后的惯性升温及非 CO_2 因子，如甲烷（CH_4）等其他人为温室气体都可能部分压缩剩余升温空间到更小的值（如黑色短虚线和浅蓝色短虚线所示）；基于修正后的剩余升温空间（纵轴上的蓝色区间）和 TCRE 得到剩余 CO_2 排放空间；但上述步骤中未考虑的其他地球系统反馈过程，如多年冻土融解所释放的碳，会部分压缩排放空间，最终得到修正后的 CO_2 排放空间（横轴上的蓝色区间）（改编自 IPCC AR6 图 5.31）

Abscissa axis denotes cumulative CO_2 emission from now on (negative value mean historical cumulative emission from a certain year to now). Vertical axis denotes global mean near-surface air temperature change relative to the pre-industrial level. Thick black line shows relationship between cumulative CO_2 emission and warming levels, and slope is the TCRE with grey cone representing uncertainty range. The dark blue horizontal line shows global warming limit of interest. The long dashed black line shows warming already realized. The space between them is the allowable future warming. Committed warming after zero CO_2 emission reached and non-CO_2 climate factors (such as other green-house gases like CH_4) could partly shrink the allowable warming space, shown by the short dashed black and light blue horizontal lines. A preliminary remaining carbon budget is derived from the corrected allowable warming and TCRE and corrected by other Earth system feedback processes, such as released carbon from melting permafrost (adapted from IPCC AR6 Figure 5.31)

⑥ 即尽管 CO_2 排放不再增加，但由于海洋的惯性作用，气温可能依然会继续升高到一定水平。

⑦ 基于 1 Pg C= 3.667 Gt CO_2 的关系，乘上 3.667，可完成 TCRE 以“℃ /(1 000 Pg C)”为单位的换算：可能范围是 1.0—2.3 ℃ /(1 000 Pg C)，最优值为 1.65 ℃ /(1 000 Pg C)。

益于减小了TCR的不确定性。

（2）利用观测记录准确度量历史升温幅度，并利用检测归因技术准确估算人类活动的贡献。工业化后直至当前的历史升温已达1℃左右，即使对2℃温控目标而言，历史升温也占据了50%的升温空间，因此历史升温估计的准确度对未来碳排放空间的估算影响很大。在IPCC AR6中，由于新数据集的出现和趋势估算方法的完善，估算的最新历史升温较IPCC AR5高约0.1℃，这压缩了未来的升温空间。需要注意的是，未来碳排放空间估算中用到的升温不能直接用观测数据来表示，因为它是指人为排放导致的那部分升温，这需要从观测升温数据中扣除掉自然气候波动的部分。采用多种观测资料、气候模拟和检测归因方法，IPCC AR6指出2010—2019年由人为导致的全球平均表面温度相对于1850—1900年的变化的最优估计值为1.07℃，可能范围是0.8℃—1.3℃。结合TCRE的最优估计值0.45℃/(1000 Gt CO_2)，±0.25℃温度变化范围所对应的未来碳排放空间的不确定性范围为±550 Gt CO_2。

（3）准确估算其他非CO_2温室气体和短寿命气候强迫因子的贡献。非CO_2温室气体包括N_2O（生命期约116±9年）等长寿命气体，以及CH_4（生命期约9.1±0.9年）、气溶胶等短寿命气候强迫因子，它们都对全球温度变化有影响。例如，CH_4在20年时间尺度内的增温效应是同等质量CO_2的80倍以上。这些非CO_2温室气体压缩了特定温控目标下的剩余升温空间，从而减少了未来碳排放空间。IPCC AR6采用综合了气候和碳循环信息的模式仿真器来评估非CO_2温室气体的排放对碳排放空间的影响。结果表明，在CO_2达到净零排放时，相对于2010—2019年，非CO_2温室气体排放对升温的贡献为0.1℃—0.2℃。不确定性来源于非CO_2强迫的地域分布及TCR的值，产生的影响是±0.1℃。在低排放情景下，减缓气候变化策略的差异使非CO_2排放产生额外±0.1℃的不确定性。综上，这部分因素（±0.2℃）造成的碳排放空间的不确定性范围为±440 Gt CO_2。

（4）准确估算CO_2实现净零排放后的惯性升温的幅度。受物理气候系统各成员（包括海洋、冰冻圈和陆地表面）的惯性和碳循环的惯性影响，人为CO_2排放降至零后，全球变暖可能依然会延续一段时间并升高一定幅度。由于TCRE反映的是“瞬态”气候响应，基于TCRE来估算剩余CO_2排放空间时，需要考虑净零排放下的惯性升温的影响。在IPCC AR6中，针对《巴黎协定》1.5℃和2℃温控目标的气候情景，设定的实现CO_2净零排放（即“碳中和”）的时间是2050年。由于《巴黎协定》的温控目标时间节点是21世纪末，因此可用50年作为评估惯性升温的时间尺度。IPCC AR6的评估显示，这50年内的惯性升温在0℃附近。不过IPCC AR6报告同时指出，评估结果存在±0.19℃的不确定性。这意味着净零排放后温度仍可能变化，对应碳排放空间的不确定性范围为±420 Gt CO_2。

（5）估算过程需要考虑地球系统反馈过程的影响。地球系统反馈是指全球变暖后多年冻土消融、野火、湿地变化等释放温室气体的过程，以及气溶胶、臭氧和沙尘等的变化对温度的影响。当前，用于气候预估的地球系统模式对地球系统反馈过程的描述不够完善，特别是没有考虑最为重要的多年冻土消融向大气释放温室气体的过程。不同的地球系统反馈过程在影响气候变化的机理、量值和不确定性方面都差异很大。IPCC AR6评估了多年冻土的CO_2和CH_4反馈，以及气溶胶和大气化学方面的反馈，并给出这些反馈的综合作用为26±97 Gt CO_2/℃，不过IPCC AR6同时也指出这一数字是低信度的。地球系统反馈过程给准确估算未来碳排放空间从而实现全球温控目标带来难度。

（6）注意TCRE分布假设对估算结果的影响。若TCRE的可能范围呈对数正态分布，那么碳排放

空间比标准正态分布下要多出 100—200 Gt CO_2。不过，现有证据并不支持 TCRE 呈对数正态分布这一假设，因此 IPCC AR6 最终采取标准正态分布假设，这压缩了对未来碳排放空间估算的范围。衡量历史升温的指标不同也会影响估算结果。例如，采用全球平均表面温度（GMST）⑧比全球平均表面气温（GSAT）在 1.5℃温控目标下的排放空间多 150—200 Gt CO_2[6]。

综上所述，如图 4 所示，要准确估算未来碳排放的空间，首先要从温控目标中扣除历史升温、净零排放后的惯性升温及非 CO_2 排放产生的升温，以得到未来剩余的升温空间；然后，再基于 TCRE 所揭示的升温和碳排放的关系，初步估算出剩余碳排放空间；接着，扣除地球反馈过程的可能影响；最终，得到温控目标下的未来 CO_2 排放空间及其不确定性的范围。上述任何一个环节的偏差，都会影响到最终估算结果的准确性（表 2）。

3 IPCC AR6 给出的碳排放空间估算结果

3.1 最低和最高排放空间及其中间值

基于图 4 的计算框架，综合 5 个方面的影响因素，IPCC AR6 给出《巴黎协定》温控目标下的未来碳排放空间（表 2）。针对 1.5℃和 2℃温控目标自 2020 年开始的未来碳排放空间中位数分别为 500 Gt CO_2 和 1350 Gt CO_2。同时，提供的还有最低和最高估算结果：对 TCRE 的分布取标准正态分布，对应 83%和 17% 2 个高、低分位数，2℃温控目标下的未来碳排放空间最低是 900 Gt CO_2、最高是 2 300 Gt CO_2，1.5℃温控目标的对应结果是 300 Gt CO_2 和 900 Gt CO_2。

基于上述估算结果，对应最为严峻的下限情形，若考虑到非 CO_2 强迫和响应、非 CO_2 强迫因子的减排水平、历史升温等影响因素的巨大不确定性，2℃温控目标下的排放空间将在未来几十年内耗尽。特别是对于 1.5℃温控目标而言，存在一个较小的概率使实现这一目标的碳排放空间为 0，即在此情况下，只有立即停止当前所有人为碳排放才有可能实现 1.5℃温控目标，这无疑是一个巨大的挑战。反之，在最为乐观的上限情况下，未来碳排放的空间较大，气候变化减缓和应对工作在时间上就相对从容。

3.2 IPCC AR6 较之 AR5 在未来排放空间上的差异及主要影响因素

造成 IPCC AR5 与 SR1.5、AR6 在未来碳排放空间上存在差异的原因，主要是估算方法的不同。

表 2　1.5℃和 2℃温控目标下未来 CO_2 排放空间及其不确定性

Table 2　Remaining CO_2 budget and related uncertainties under limiting 1.5℃ and 2℃ warming targets

相对于 1850—1900 年的升温（℃）	2010—2019 年之后的额外升温（℃）	不同 TCRE 分位数的 CO_2 排放空间（Gt）*					未来非 CO_2 排放情景的变化（Gt CO_2）	与地域分布相关的不确定性（Gt CO_2）		
								非 CO_2 强迫和响应的不确定性	历史升温不确定性	惯性升温不确定性
—	—	17%	33%	50%	67%	83%	±220	±220	±550	±420
1.5	0.43	900	650	500	400	300				
2.0	0.93	2 300	1 700	1 350	1 150	900				

* 从2020年1月开始计算的剩余CO_2排放空间（已包含地球系统反馈过程的影响），受未来情景变化和与地域分布相关的不确定性因素影响

* The remaining CO_2 budget calculated from January 2020 (Earth system feedbacks included) is affected by future scenario changes and uncertainties related to geographical distribution

注：改编自IPCC AR6表5.8

Note: adapted from IPCC AR6 Table 5.8

⑧ 即陆地用表面气温资料、海洋上用表层海温资料来计算全球平均温度。

IPCC AR5 中采用了多种估算碳排放空间的方法，而且难以相互比较和统一。以 2℃ 温控目标为例，IPCC AR5 首先给出了直接基于 TCRE 估算的 2℃ 温控目标下自 1861—1880 年开始的总 CO_2 排放空间，数值为 3 670—4 440 Gt CO_2。由于 1870—2011 年的累积历史排放量为（1890±260）Gt CO_2，在合理的概率分布假设下，扣除历史排放量后，计算得到 2012 年后的剩余排放量为 1 720—2 650 Gt CO_2；再进一步扣除 2012—2019 年的实际碳排放量 320 Gt CO_2，得到换算为 2 020 年后的排放空间为 1 400—2 330 Gt $CO_2$⑨，这一数值要显著高于 IPCC SR1.5 和 AR6 的评估结果。

由于 TCRE 只与 CO_2 有关，但升温却是多种气候强迫因子共同作用的结果。例如，CH_4 等非 CO_2 温室气体也会造成部分升温。因此，上述算法高估了未来碳排放空间。为合理考虑非 CO_2 温室气体的影响，IPCC AR5 还直接给出 RCP8.5 情景下地球系统模式达到升温 2℃ 时的累积碳排放结果，数值为 2 900—3 010 Gt CO_2[5]。在合理的概率分布假设下，扣除到 2011 年的历史累积排放量和 2012—2019 年的实际排放量⑨，最终得到 2020 年后的排放空间为 620—870 Gt CO_2，这又显著低于 IPCC SR1.5 和 AR6 的评估结果（图 3）。RCP8.5 情景中非 CO_2 温室气体的辐射强迫过强可能给这一结果带来较大偏差。此外，IPCC AR5 未考虑未来土地利用变化的碳排放，这会造成低估碳排放的结果；同时，由于未考虑多年冻土消融释放温室气体等地球系统反馈过程的影响，这又会造成高估碳排放的结果。上述不足均影响了 IPCC AR5 结果的可信度。

2015 年，《巴黎协定》签订后，1.5℃ 和 2℃正式成为 UNFCCC 框架下由缔约国谈判达成的温控目标，使未来碳排放空间的估算得到高度重视。2018 年公布的 IPCC SR1.5 发展了新的估算未来碳排放空间的框架，其中单独考虑了历史升温的影响，即估算未来碳排放空间首先要估算未来的升温空间。在这个框架下，可以自然引入其他强迫因子对升温的影响。IPCC SR1.5 沿用了 IPCC AR5 估算的 TCRE 数值，同时对地球系统反馈过程（如多年冻土消融排碳）只给出了粗略估计，仅作为未来碳排放空间的修正项，并未纳入估算值中；认为未来碳排放空间（以 CO_2 计）在 20 世纪内可能要因此减少 100 Gt CO_2。

在 IPCC SR1.5 所发展的新框架基础上，IPCC AR6 采用了多种约束手段以减小 TCRE 的不确定性范围，使用了最新的排放和温度观测数据，同时综合评估了各种地球系统反馈过程对碳排放空间的影响，包括多年冻土中 CO_2 和 CH_4 反馈，以及与气溶胶和大气化学有关的反馈过程。在此基础上，估算的未来碳排放空间值较之以往更为准确。

4 建议加强的研究领域

未来碳排放空间估算结果存在较大不确定性，这给碳减排政策的制定带来难度和风险。因此，提升估算的准确性具有迫切的决策支撑需求。基于当前的科学认知水平，关于未来碳排放空间的估算误差，按照不确定性的大小排序，分别是：工业革命以来历史升温的不确定性、海洋惯性升温的不确定性、非 CO_2 排放情景和对非 CO_2 强迫响应的不确定性。因此，以提高未来碳排放空间估算的准确度为目标，提出 6 点建议。

*（1）加强历史资料整编和检测归因研究，减小人为历史升温估算结果的不确定性。*由表 2 可以看出，在估算人为外强迫导致的历史升温方面，其结果的不确定性是几种影响因子中最大的（±550 Gt CO_2）。这一方面需要提高历史强迫数据的准确性，包括人为气溶胶排放；另一方面则需要提高检测归因方法的准确性。检测归因依赖于气候模式，这就需要提高气候

⑨ 计算方法见附录 1。

模式性能，使其能够准确模拟气候系统对不同种类强迫因子的响应。目前，亟待提升的是对气溶胶响应过程、气溶胶与云的相互作用过程描述的准确性。

（2）加强气候系统反馈过程研究，准确估算敏感度指标 TCRE。TCRE 的不确定主要来自气候敏感度 TCR 的不确定性。基于多种来源的证据，IPCC AR6 给出的 TCR 估算结果的不确定性范围比 IPCC AR5 明显减小。若要继续提高精度，首先需要加强气候反馈机制的研究。其中，云短波反馈是导致气候敏感度不确定性的最大来源，也是当前气候模式发展完善的难点[8-14]；它与目前认识薄弱的云-对流相互作用过程密切相关[15-18]，并和其他反馈过程（如海冰反照率）存在复杂的相互作用[19]。云反馈过程还能影响我国气候的模拟和未来季风气候的预估[20-22]，因此尤其值得关注。同时，要加强深层海洋的观测研究，以及未来增暖空间型和海洋热吸收型预估的研究。海洋惯性升温的大小和增暖型有关，高纬度海洋热吸收要比低纬度海洋热吸收对全球增暖的减缓作用更强。明晰未来的增暖型和海洋热吸收型、减小海洋热吸收估算的不确定性、提高 TCR 的估算精度，将有助于提升未来碳排放空间估算的准确性。

（3）加强地球系统碳源、碳汇过程与全球增暖关系的研究。随着累积碳排放的增加和全球温度的升高，海洋和陆地作为碳汇的功能将减弱，表现为海洋和陆面对人为排放 CO_2 的吸收比例将逐渐下降[2]，每升温 0.5℃，吸收率降低约 5%（图 5）。此外，目前认为随着大气 CO_2 浓度的升高，CO_2 的辐射强迫也会降低，这又会抵消海陆碳汇减弱的作用——不过这种抵消作用在多少碳排放空间内成立尚不清楚。面向更为长远的未来，在累积碳排放超过 5 500 Gt CO_2 后，升温幅度和累积排放间的关系将变得更为复杂，目前相关研究鲜有报道。

（4）加强非 CO_2 温室气体和多年冻土等对全球增暖的影响研究。包括 CH_4 在内的非 CO_2 温室气体的排放，能够通过侵占升温空间而造成未来碳排放空间的减少，因此需要加强 CH_4、N_2O 等非 CO_2 温室气体对全球增暖的影响研究。这在中美签署的《关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》中我国表示要在控制和减少 CH_4 排放方面取得显著效果的背景下显得尤为重要。随着气候增暖，多年冻土消融将通过释放 CH_4 和 CO_2 对升温产生显著影响，这是一种重要的地球系统反馈过程。我国拥有约 $1.6×10^6$ km^2 的多年冻土区[23-25]，亟待加强对这些区域的监测和气候影响预测研究。

（5）加强对高于 1.5℃ 和 2℃ 温控目标的升温阈值下碳排放空间的研究。《巴黎协定》的 2℃ 和 1.5℃

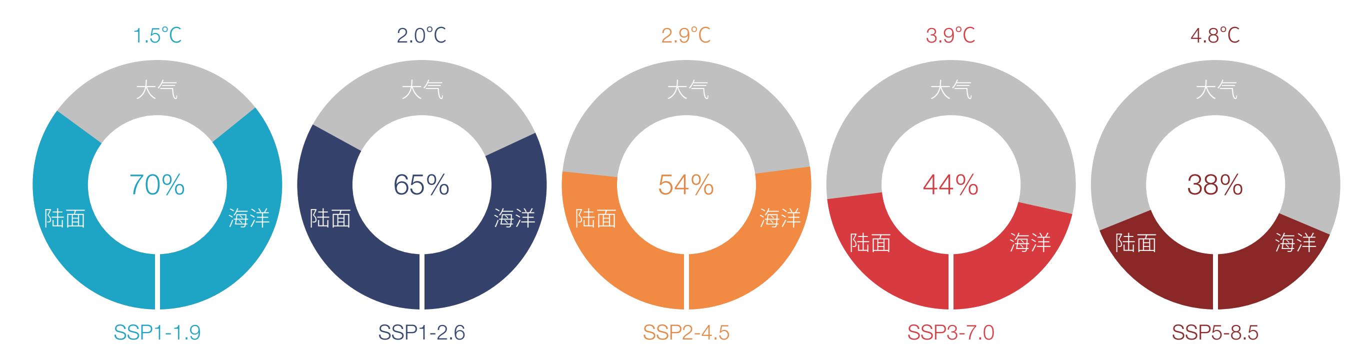


图 5　5 种未来社会经济情景下到 2100 年累积人为 CO_2 排放被陆面和海洋吸收的比例及对应全球平均地表气温相对于 1850—1900 年的变化

Figure 5　Cumulative anthropogenic CO_2 emissions taken up by land and ocean, and global mean surface air temperature change relative to 1850–1900 by 2100 under five shared socioeconomic pathways

改编自 IPCC AR6 决策者摘要图 7

Adapted from IPCC AR6 SPM.7

温控目标，是UNFCCC缔约方通过谈判设定的政治目标。科学研究需要不囿于政治目标。例如，IPCC AR6在1.5℃和2℃温控目标的基础上，还给出了3℃—4℃升温阈值下的气候预估结果。学术界应对升温的各种可能情景做好前置性研究准备。

（6）加强我国地球系统模式研发的统筹协调，推动其在包括碳排放空间预估等地球系统碳循环研究中的应用。气候模式在反馈过程研究、气候敏感度估算、历史温度变化的检测归因研究中发挥着不可替代的作用。气候系统模式在近30年来取得了快速发展。以“国际耦合模式比较计划”（CMIP）为例，参加CMIP1的研究机构有11家，参加CMIP5的有19家，参加CMIP6的则有28家[26]。在参加CMIP6的模式中，最终数据被IPCC AR6正式采用的模式版本有39个，其中我国的6家机构贡献了8个模式版本[27]。我国参加CMIP6的模式数量是世界各国中最多的，但是最终为IPCC AR6提供了碳循环数据的模式只有1个。地球系统模式是支撑气候变化和地球系统科学研究的重要平台，也是国际竞争的前沿[28]。建议加强我国在地球系统模式研发领域的统筹协调，发挥新时代举国体制的优势，尽早实现“由多到强”的转变，从而在碳排放空间预估、碳收支平衡估算等支撑国际气候变化治理谈判的前沿领域提高话语权。

5 结语

应对气候变化是中国可持续发展的内在要求，也是负责任大国应尽的国际义务。2020年9月22日，在第75届联合国大会一般性辩论上，国家主席习近平宣布“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，CO_2排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”。这彰显了我国负责任大国的形象，是推动构建人类命运共同体的具体举措。《巴黎协定》温控目标的实现，依赖于碳减排方面的国际行动。UNFCCC将于2023年11月完成第一次全球碳盘点，此后每5年更新一次盘点工作。全球盘点和未来碳排放空间估算数据，将是UNFCCC框架下包括《巴黎协定》和《格拉斯哥气候公约》履约等气候治理国际谈判的重要数据基础。

作为全球碳排放的参考基准，《巴黎协定》温控目标下的未来碳排放空间可以逐年核算，能够对国际气候变化谈判和气候变化应对工作形成有效支撑。基于当前的估算数据，考虑到结果的不确定性，目前各主要国家自主贡献目标的碳排放总和，有可能超过1.5℃甚至2℃所要求的剩余排放空间[29]。因此，要实现国家间碳排放空间的公平分配、保持全球目标的协调一致，科学界首先需要提供精准的碳排放空间核算数据。推动和引导建立公平合理、合作共赢的全球气候治理体系，需要坚实的科学支撑，气候科学界在这方面责任重大。

致谢 *感谢中国科学院前沿科学与教育局段晓男对本文撰写和修改提供的富有建设性的建议！*

参考文献

1 Obergassel W, Arens C, Hermwille L, et al. Phoenix from the Ashes—Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015-12-12)[2021-12-20]. https://www.researchgate.net/publication/291971431_Phoenix_from_the_Ashes-An_Analysis_of_the_Paris_Agreement_to_the_United_Nations_Framework_Convention_on_Climate_Change.

2 IPCC. Summary for policymakers// Masson-Delmotte V, Zhai P M, Pirani A, et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 3-31.

3 Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2020. Earth System Science Data, 2020, 12(4): 3269-3340.

4 Canadell J G, Monteiro P M S, Costa M H, et al. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks// Masson-

Delmotte, Zhai V P, Pirani A, et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 1152-1425.

5 Collins M, Knutti R, Arblaster J, et al. Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility// Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1029-1136.

6 Rogelj J, Shindell D, Jiang K J, et al. Mitigation pathways compatible with 1.5℃ in the context of sustainable development// Masson-Delmotte V, Zhai P M, Pörtner H O, et al. Global Warming of 1.5℃. Cambridge: Cambridge University Press, 2018: 93-174.

7 Zhou T J, Chen X L. Uncertainty in the 2℃ warming threshold related to climate sensitivity and climate feedback. Journal of Meteorological Research, 2015, 29(6): 884-895.

8 吴春强, 周天军. CFMIP大气环流模式模拟的东亚云辐射强迫特征. 气象学报, 2011, 69(3): 381-399.

Wu C Q, Zhou T J. Characteristics of cloud radiative forcings over East Asia as simulated by the AGCMs in the CFMIP. Acta Meteorologica Sinica, 2011, 69(3): 381-399. (in Chinese)

9 Wu C Q, Zhou T J, Sun D Z, et al. Water vapor and cloud radiative forcings over the Pacific Ocean simulated by the LASG/IAP AGCM: Sensitivity to convection schemes. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(1): 80-98.

10 刘景卫, 周天军, 吴春强, 等. 海气耦合模式FGOALS_gl模拟的水汽和云辐射反馈过程. 大气科学, 2011, 35(3): 531-546.

Liu J W, Zhou T J, Wu C Q, et al. Water vapor and cloud radiative feedback processes in the ocean-atmosphere coupled model FGOALS_gl. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(3): 531-546. (in Chinese)

11 郭准, 吴春强, 周天军, 等. LASG/IAP和BCC大气环流模式模拟的云辐射强迫之比较. 大气科学, 2011, 35(4): 739-752.

Guo Z, Wu C Q, Zhou T J, et al. A comparison of cloud radiative forcings simulated by LASG/IAP and BCC atmospheric general circulation models. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(4): 739-752. (in Chinese)

12 郭准, 周天军. 一个改进的诊断层积云方案及其对大气环流模式性能的改进. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(5): 1034-1048.

Guo Z, Zhou T J. An improved stratocumulus scheme based on estimated inversion strength and its performance in GAMIL2. Scientia Sinica Terrae, 2014, 44(5): 1034-1048. (in Chinese)

13 Chen X L, Zhou T J, Guo Z. Climate sensitivities of two versions of FGOALS model to idealized radiative forcing. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(6): 1363-1373.

14 张华, 王菲, 汪方, 等. 全球气候变化中的云辐射反馈作用研究进展.中国科学: 地球科学, 2021, doi: 10.1360/SSTe-2021-0052.

Zhang H, Wang F, Wang F, et al. Advances in cloud radiative feedbacks in global climate change. Scientia Sinica Terrae, 2021, doi: 10.1360/SSTe-2021-0052. (in Chinese)

15 郭准, 周天军. 新旧两个版本GAMIL模式对1997/98强El Niño年西太平洋暖池区独特云辐射强迫特征的数值模拟. 大气科学, 2012, 36(5): 863-878.

Guo Z, Zhou T J. The cloud-radiative forcing over the western Pacific warm pool during 1997/98 simulated by two versions of LASG/IAP atmospheric general circulation model. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(5): 863-878. (in Chinese)

16 Zhang H P, Wang M H, Guo Z, et al. Low-cloud feedback in CAM5-CLUBB: Physical mechanisms and parameter sensitivity analysis. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2018, 10(11): 2844-2864.

17 Chen X L, Guo Z, Zhou T J, et al. Climate sensitivity and feedbacks of a new coupled model CAMS-CSM to idealized CO_2 forcing: A comparison with CMIP5 models., Journal of Meteorological Research, 2019, 33(1): 31-45.

18 Zhang B C, Guo Z, Chen X L, et al. Responses of cloud-radiative forcing to strong El Niño events over the western Pacific warm pool as simulated by CAMS-CSM. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(3): 499-514.

19 Shi X L, Chen X L, Dai Y W, et al. Climate sensitivity and feedbacks of BCC-CSM to idealized CO_2 forcing from CMIP5 to CMIP6. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(4): 865-878.

20 Guo Z, Zhou T J, Wang M H, et al. Impact of cloud radiative heating on East Asian summer monsoon circulation. Environmental Research Letters, 2015, 10(7): 074014.

21 Chen X L, Zhou T J, Wu P L, et al. Emergent constraints on future projections of the western North Pacific Subtropical High. Nature Communications, 2020, 11: 2802.

22 Guo Z, Zhou T, Wang M H, et al. The role of Tibetan summer low clouds in the simulation of the East Asian summer monsoon rain belt. International Journal of Climatology, 2021, doi: 10.1002/joc.7405.

23 Ran Y H, Li X, Cheng G D, et al. Distribution of permafrost in China: An overview of existing permafrost maps. Permafrost and Periglacial Processes, 2012, 23(4): 322-333.

24 Ding J Z, Chen L Y, Ji C J, et al. Decadal soil carbon accumulation across Tibetan permafrost regions. Nature Geoscience, 2017, 10(6): 420-424.

25 Ding J Z, Wang T, Piao S L, et al. The paleoclimatic footprint in the soil carbon stock of the Tibetan permafrost region. Nature Communications, 2019, 10: 4195.

26 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划（CMIP6）评述. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445-456.

Zhou T J, Zou L W, Chen X L. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). Advances in Climate Change Research, 2019, 15(5): 445-456. (in Chinese)

27 周天军, 陈梓明, 邹立维, 等. 中国地球气候系统模式的发展及其模拟和预估. 气象学报, 2020, 78(3): 332-350.

Zhou T J, Chen Z M, Zou L W, et al. Development of climate and earth system models in China: Past achievements and new CMIP6 fesults. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 332-350. (in Chinese)

28 周天军, 张文霞, 陈德亮, 等. 2021年诺贝尔物理学奖解读：从温室效应到地球系统科学. 中国科学：地球科学, 2022, doi: 10.1360/SSTe-2021-0338.

Zhou T J, Zhang W X, Chen D L, et al. Introduction to nobel prize in ohysics 2021: From greenhouse effect to earth system science. Scientia Sinica Terrae, 2022, doi: 10.1360/SSTe-2021-0338. (in Chinese)

29 Matthews H D, Tokarska K B, Nicholls Z R J, et al. Opportunities and challenges in using remaining carbon budgets to guide climate policy. Nature Geoscience, 2020, 13: 769-779.

Perspective on Challenges in Accurately Estimating Remaining Carbon Budget for Climate Targets of Paris Agreement

ZHOU Tianjun[1,2*] CHEN Xiaolong[1]

(1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In 2015, by signing up to the Paris Agreement on climate change, the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) parties pledged to keep global temperatures “well below” 2°C above pre-industrial levels and to “pursue efforts to limit the temperature increase even further to 1.5°C”. Limiting warming to 1.5°C / 2°C requires strictly limiting the total amount of carbon emissions between now and the end of the century. Global mean surface temperature has already witnessed a 1°C more warming since the pre-industrial era and the cumulative anthropogenic CO_2 emission has reached around 2 390 Gt CO_2. An accurate estimation of the allowable amount of additional carbon emissions, known as the “remaining carbon budget”, is crucial to climate change mitigation activities. In this study, we hope to provide a commentary on improving the quality and reducing the uncertainty in remaining carbon budget estimation. After a brief review on the relationship between carbon cycle and global warming, we introduce the methods for estimating the remaining carbon budget and compare the results presented in a series of assessment reports since IPCC AR5 and IPCC AR6. The reasons for the different estimations of remaining

*Corresponding author

carbon budget presented in the reports are discussed. Finally, the priorities of future research fields/directions toward an accurate estimation of remaining carbon budget are proposed.

Keywords Paris Agreement, climate targets, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), remaining carbon budget



周天军 中国科学院大气物理研究所研究员、博士生导师，中国科学院大学岗位教授。主要从事气候动力学和气候模拟研究，2018—2021年连续入选科睿唯安地球科学全球“高被引科学家”。政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告（AR5）、第六次评估报告（AR6）的主要作者。世界气候研究计划（WCRP）耦合模拟工作组（WGCM）委员、牛津气候百科全书顾问委员会委员、“全球季风模拟比较计划”（GMMIP）共同主席。国家重点研发计划“地球系统与全球变化”专家组成员、*Science Bulletin*副主编等；曾任英国皇家气象学会期刊*International Journal of Climatology*、*Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*副主编等。E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

ZHOU Tianjun Research Fellow and Ph.D. Supervisor of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS). He works on climate modeling and climate dynamics, with focus on monsoon and how the climate system responds to anthropogenic and natural forcing agents. He was named to the prestigious Highly Cited Researcher list from Clarivate Analytics for Geosciences (2018–2021), the prestigious Highly Cited Chinese Researcher list from Elsevier (2014–2020). He served as the Leading Author on the 5th and 6th Assessment Reports by the Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). He is also a member of the CLIVAR (Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change) Working Group on Coupled Modelling and co-chair of CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project-phase 6) Global Monsoon Model Inter-comparison Project (GMMIP). He is the Advisory Editor of Oxford Research Encyclopedia of Climate Science, a member of Panel of Experts for Special Foundation for State Major Basic Research Program of China entitled “Earth System and Global Change”. He is the associated editor (AE) of *Science Bulletin*, and AE of *Journal of Meteorology Research*. He was the chief editor of *Advances in Atmospheric Sciences*, AE of *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, AE of *International Journal of Climatology*, and AE of *Asian-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

附录1 基于IPCC AR5和SR1.5数据估算2020年后的碳排放空间的方法

IPCC AR5于2013年发布，给出了1.5℃和2℃温控目标下自1861—1880年开始的累积碳排放空间，数值分别为2 240—2 270 Gt CO_2（这里给出的是50%—67%的分位数范围，下同）和2 900—3 010 Gt CO_2，同时还给出了到2011年总的人为历史碳排放量是（1 890±260） Gt CO_2。由于未来碳排放空间问题是在《巴黎协定》于2015年签订后才受到重视，2013年公布的IPCC AR5并未直接给出2012年以后的排放空间估算[①]。在对总排放空间和历史排放量做出合理的分布假设前提下，根据AR5的数据，通过蒙特卡洛随机取样，计算得到1.5℃和2℃温控目标下2012年以后的剩余碳排放空间分别为260—460 Gt CO_2和940—1 190 Gt CO_2。具体过程如下。

（1）IPCC AR5技术总结报告的TEF.8图1中给出了基于模式评估的1.5℃和2℃升温阈值下自1870年以后总的CO_2排放空间在概率>10%、>33%、>50%、>67%、>90% 5个分位点上的值。对于1.5℃温控目标，结果分别为2 970 Gt CO_2、2 570 Gt CO_2、2 270 Gt CO_2、2 240 Gt CO_2、1 830 Gt CO_2；对于2℃温控目标，结果分别为3 960 Gt CO_2、3 300 Gt CO_2、3 010 Gt CO_2、2 900 Gt CO_2、2 460 Gt CO_2[①]。然而，基于TCRE估计的2℃升温阈值下的总排放空间的33%、50%、

① Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

67% 的分位数为 5 760 Gt CO_2、4 440 Gt CO_2、3 010 Gt CO_2[①]。

（2）由于上述总排放空间数据的概率分布表现为偏态分布，对总排放空间采用对数正态分布假设，利用分位点拟合对应的累积分布函数，得到基于模式的总排放空间在 1.5℃ 阈值下接近 $\ln X \sim N(\mu=7.76, \sigma=0.19)$ 的对数正态分布，在 2℃ 阈值下接近 $\ln X \sim N(\mu=8.03, \sigma=0.18)$ 的对数正态分布。基于 TCRE 的总排放空间在 2℃ 阈值下接近 $\ln X \sim N(\mu=8.42, \sigma=0.52)$ 的对数正态分布。

（3）IPCC AR5 给出 1870—2011 年人为排放 CO_2 总量为（1 890±260）Gt CO_2，由 AR5 第 6 章表 6.1 可知，这一范围代表 90% 的置信区间[①]，因此，可认为其遵循 $X \sim N(\mu=1890, \sigma=130)$ 的正态分布。

（4）通过计算总排放空间与 1870—2011 年累积人为 CO_2 排放之差，得到 2012 年之后的剩余碳排放空间。采用蒙特卡洛方法，在两者的分布中各随机生成 10 万个样本，得到其差值的分布中概率 >50% 和 >67% 的分位数。基于地球系统模式预估的结果，估算 1.5℃ 和 2℃ 温控目标下的剩余碳排放空间分别为 260—460 Gt CO_2 和 940—1 190 Gt CO_2；而基于 TCRE 的结果，估算 2℃ 温控目标下的剩余碳排放空间为 1 720—2 650 Gt CO_2。

根据《2020 年全球碳收支报告》[②]，2012—2019 年的实际碳排放量为 320 Gt CO_2，从 2012 年后的排放空间中扣除这部分历史排放，得到基于 IPCC AR5 地球系统模式数据所折算的 2020 年后 1.5℃ 温控目标下的未来排放空间是 −60—140 Gt CO_2，2℃ 温控目标下结果为 620—870 Gt CO_2。而基于 TCRE 的结果，估算的 2℃ 温控目标下的 2020 年后的未来碳排放空间则为 1 400—2 330 Gt CO_2。

此外，SR1.5 于 2018 年发布，给出的 2018 年后在 1.5℃ 和 2℃ 温控目标下剩余碳排放空间分别为 420—580 Gt CO_2 和 1 170—1 500 Gt CO_2[③]。根据《2020 年全球碳收支报告》[②]，2018—2019 年的实际碳排放量为 80 Gt CO_2，扣除这部分历史排放，得到 2020 年后 1.5℃ 温控目标下未来碳排放空间是 340—500 Gt CO_2，2℃ 温控目标下为 1 090—1 420 Gt CO_2。

■责任编辑：文彦杰

② Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. Global Carbon Budget 2020. Earth System Science Data, 2020, 12(4): 3269-3340.

③ Masson-Delmotte V, Zhai P M, Pörtner H O, et al. Global Warming of 1.5℃. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5℃ above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.